



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9995>

#### **To cite this version :**

Nicolas BOYARD, Mickaël RIVETTE, Olivier CHRISTMANN, Simon RICHIR - Méthodologie de prise en compte de la fabrication additive lors de la phase de conception - In: Colloque national AIP Primeca (13; 2012), France, 2012-03-27 - Colloque national AIP Primeca - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [archiveouverte@ensam.eu](mailto:archiveouverte@ensam.eu)



# METHODOLOGIE DE PRISE EN COMPTE DE LA FABRICATION ADDITIVE LORS DE LA PHASE DE CONCEPTION

**Nicolas Boyard (1), Mickaël Rivette (1), Olivier Christmann (1), Simon Richir (1)**

(1) Arts et Métiers ParisTech, LAMPA, 2 Bd du Ronceray, 49000 Angers, France, 02 41 20 73 73,  
{nicolas.boyard, mickael.rivette, olivier.christmann, simon.richir}@ensam.eu

## Résumé

*Le développement des machines de fabrication additive offre de nouvelles possibilités de conception de pièces dont la réalisation était jusque-là impossible. Cependant, de la même manière que les concepteurs se sont accordés sur des règles pour les procédés de fabrication classiques (i.e. procédés par enlèvement de matière), une nouvelle méthodologie de conception devra voir le jour pour la fabrication additive pour s'adapter aux avantages et aux contraintes de ce procédé innovant. La réalité virtuelle grâce à des modes de représentation expressifs, pourrait faciliter l'adoption de cette méthodologie. Il s'agit donc de démontrer la nécessité d'un changement de méthodologie de conception et de proposer une nouvelle méthodologie, plus adaptée. La réalité virtuelle peut être un outil d'aide dans cette démarche de changement.*

**Mots clés: méthodologie de conception, fabrication additive, réalité virtuelle**

## 1 Introduction

Cet article vise à présenter les méthodologies de conception orientées fabrication additive et le potentiel d'utilisation de ce procédé dans l'industrie. Nous verrons aussi l'éventualité d'un changement de paradigme pour intégrer ce procédé dans la chaîne de conception. Dans un second temps, un travail prospectif sur l'utilisation de la Réalité Virtuelle sera effectué dans le but d'aider au changement de méthodologie. Cet article est une introduction à un travail de thèse.

Actuellement, il existe deux branches principales de la conception dans le domaine de l'industrie : la conception pour la fabrication (Design For Manufacturing) et la conception pour l'assemblage (Design for Assembly) [1]. Ces deux méthodologies reposent sur les connaissances déjà établies et sur les procédés de fabrication classique. Ces procédés sont répartis en 3 grandes familles : l'enlèvement de matière, la fusion et la déformation plastique. Cependant, il existe une quatrième famille de procédés émergeant actuellement : la fabrication par ajout de matière (figure 1). Ce procédé est très innovant car il permet de fabriquer des pièces ab nihilo [2]. Le principe de la Fabrication Additive (FA) par dépôt de matière est le suivant (figure 2) : une tête d'impression vient déposer de la matière sur une embase (le plus souvent, il s'agit d'une plaque) qui peut se translater verticalement. Dans un premier temps l'embase est figée à une altitude donnée. Une fois que la tête a déposé le (ou les) premier(s) cordon(s) de matière, ce qui correspond à la première couche, l'embase descend d'une hauteur égale à l'épaisseur du cordon. La tête vient déposer une seconde couche de matière sur la première. Le processus est itéré jusqu'à la fabrication, strate par strate, de la pièce demandée. Dans le cas des procédés où la matière repose sur du vide, un second matériau, appelé support, est déposé en même temps que la pièce pour permettre le dépôt de matière. Une fois la pièce terminée, le support est retiré. Les procédés dits « en lit de matière », comme l'impression sur poudre, ne nécessitent pas de support. Pour ces procédés, la matière est déjà présente sous forme de couche de poudre qu'on vient agglomérer aux endroits désirés à l'aide d'un procédé liant la poudre non « solidifiée » servant dans ce

cas de support. Certains procédés actuels, tels que le soudage [3] ou le frittage [4], sont également des procédés d'addition de matière. Cependant, nous ne les traiterons pas dans cet article comme étant de la fabrication additive. En effet, le frittage s'effectue dans un moule dédié et nécessite donc l'utilisation préalable d'un procédé d'enlèvement de matière pour la fabrication d'un outil spécifique à une pièce donnée. De même, le soudage ne peut être entièrement considéré comme étant un procédé de fabrication additive car, même s'il permet un ajout de matière par rechargement, ce procédé ne permet pas, à lui seul, d'obtenir des pièces fonctionnelles. Il est essentiellement utilisé dans le cas de réparation de pièces.

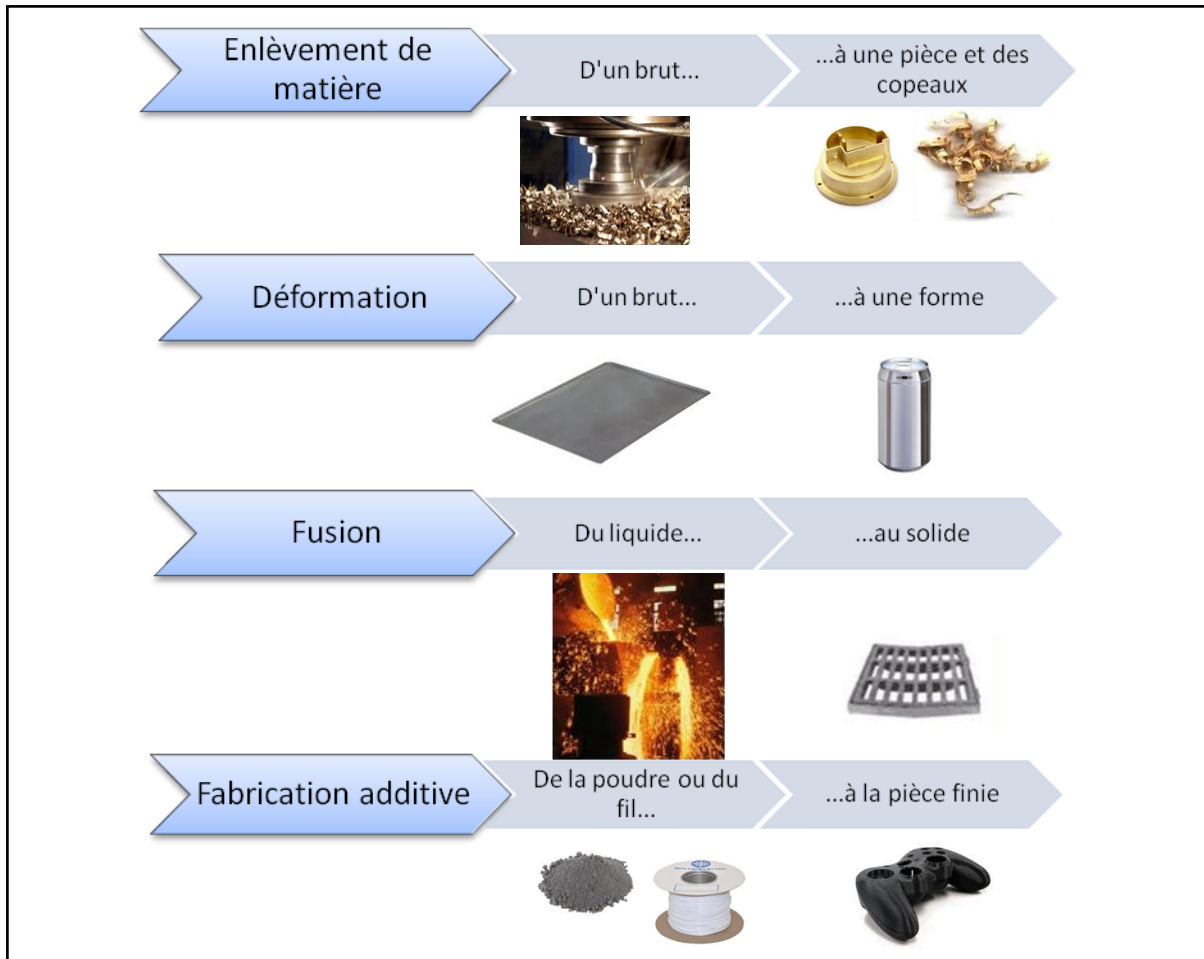


Figure 1. *Récapitulatif des grandes familles de types de procédés de fabrication*

La figure ci-dessus représente les 4 grandes familles de procédés de fabrication. Elle montre que le nouveau type de procédé de fabrication qu'est la fabrication additive, regroupant entre autre la FDM (Fused Deposition Modeling) [5], le SLS (Selective Laser Sintering) [6], SLM (Selective Laser Melting) [7], 3D-printing [8], CLAD (Construction Laser par Addition Directe) [9], etc... est différente des autres familles de procédés et ne les remplace pas, mais vient les compléter.

On commence déjà à voir apparaître une rupture avec les procédés précédents. Le principe adopté habituellement est plutôt celui du sculpteur qui, à partir d'un bloc de matière, utilise des outils pour creuser ou donner aux matériaux la forme qu'il souhaite. Ceci peut paraître moins évident pour le moulage, mais il ne faut pas oublier qu'une pièce forgée provient d'un moule, lui-même obtenu grâce à un procédé d'enlèvement de matière. Et, même s'il est possible de recharger une pièce en métal sur le principe de la soudure, un travail de rectification est nécessaire et en aucun cas il n'est possible de réaliser une pièce fonctionnelle, ni même un brut.

Ainsi, dans un premier temps, ce qui différencie la fabrication additive des autres procédés, est la direction de travail. On ne cherche plus à enlever de la matière, mais à en ajouter. Si bien que, théoriquement, le volume et la complexité de la pièce finale sont infinis [10] même si, actuellement, l'espace de fabrication dont dispose la machine est une contrainte au volume de la pièce [11].

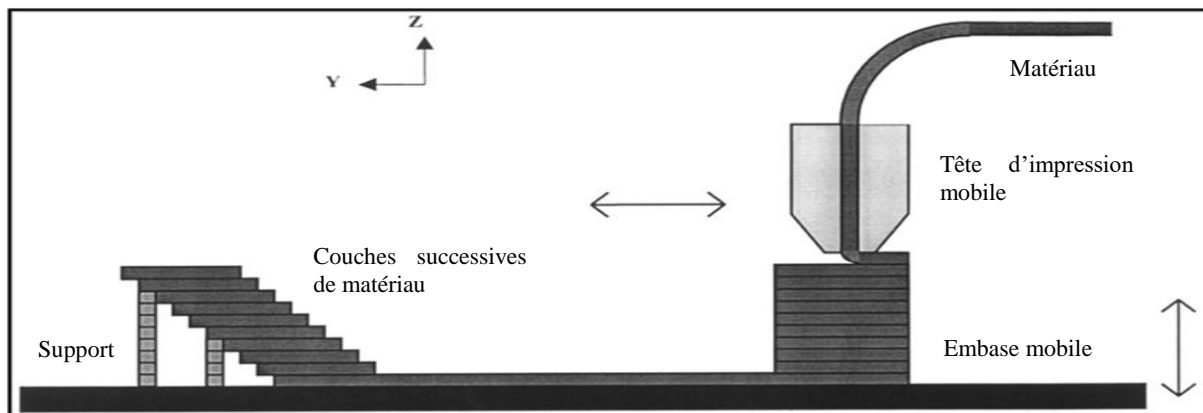


Figure 2. *Principe de fabrication additive FA*

De plus, le procédé de FA permet de fabriquer des éléments multi matériaux aux propriétés encore inédites ou de réaliser des assemblages de pièces mobiles les unes par rapport aux autres, et ce en une seule phase de fabrication. Il existe déjà des assemblages réalisés en fabrication additive mais, soit ce ne sont que des prototypes, soit ils ne sont pas fonctionnels, soit ils sont réalisés en polymères et leur utilisation est limitée. Les objets multi matériaux réalisés par fabrication additive sont quant à eux à l'état d'étude ou de prototypes [12].

## 2 Problématique

Comme nous venons de le voir, la FA apporte un certain nombre d'éléments nouveau par rapport aux autres types de procédés de fabrication. Cependant, il reste encore plusieurs étapes à franchir avant de pouvoir réaliser des objets fonctionnels en FA. Ce procédé visant à être développé dans les années à venir doit être intégré au plus tôt dans la phase de conception du produit. Ceci amène donc à la question : Les règles de conception vont-elles être amenées à évoluer pour intégrer la FA ?

Un travail de recherche, effectué par Hugo Rodrigue, traite notamment de la pertinence des méthodes Design for Assembly (DFA) et Design for Manufacturing (DFM) vis-à-vis de la FA [13]. Les méthodologies du DFA sont largement utilisées dans l'industrie afin de concevoir des produits faciles à assembler en utilisant des méthodes d'assemblage spécifiques afin de minimiser les coûts et les temps d'assemblage. Les méthodes de DFA les plus courantes sont la méthode Lucas DFA Evaluation Method [14], Hitachi Assemblability Evaluation Method [15] et la portion DFA de la méthodologie Boothroyd-Dewhurst DFMA Method. Ces méthodes sont utiles dans un contexte de fabrication de masse puisqu'elles visent à adapter le produit pour une méthode spécifique d'assemblage, mais ne tentent pas d'améliorer les fonctions et les performances du produit, ce qui pourrait être facilement réalisable à l'aide de la FA. Toutefois, un des outils de la portion DFA de la méthodologie Boothroyd-Dewhurst se basant sur trois questions pour déterminer le nombre théorique minimal de pièces de l'assemblage pourrait être utile dans le contexte d'une méthodologie pour la FA. La portion de DFM de la méthodologie Boothroyd-Dewhurst DFMA Method guide l'utilisateur à choisir le procédé de fabrication approprié et à modifier les pièces en se basant sur les limitations de ces procédés pour s'assurer de la fabricabilité de la pièce et pour réduire les coûts de fabrication. Toutefois, le but n'est pas d'améliorer le produit et la méthode ne tente pas d'incorporer les avantages des procédés de fabrication dans le processus de conception. Pour cette raison, ce type de méthode n'est pas approprié pour la FA. La méthodologie DFRM (Design For Rapid Manufacturing) proposée par H. Rodrigue (figure 3) s'oriente autour de deux idées principales : la prévention de défaillance et la satisfaction des buts définis par l'utilisateur.

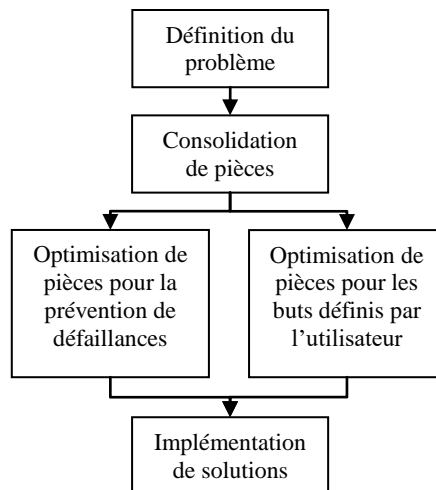


Figure 3. *Méthodologie de conception orientée DFRM*

La définition du problème consiste en l'obtention du cahier des charges complet du produit, d'une maquette CAO et d'une nomenclature. La consolidation de pièces utilise ces informations pour déterminer quelles pièces peuvent être fusionnées afin de simplifier l'assemblage en s'appuyant sur les critères des candidats à l'élimination de Boothroyd-Dewhurst. Une fois que la maquette a été simplifiée, deux optimisations sont lancées en parallèle : une dans le but de prévenir les défaillances, une dans le but de satisfaire les besoins du client. Ces optimisations s'appuient sur une décomposition fonctionnelle de l'assemblage à laquelle est appliquée la méthode Risk in Early Design et sur des méthodes de développement de concept et d'optimisation numérique. Les résultats de ces deux optimisations sont ensuite compilés dans le but de sélectionner la solution qui sera industrialisée. Cette méthodologie est donc davantage adaptée pour la reconception de pièces. Cependant elle pourrait être enrichie pour permettre son utilisation dès la conception de nouvelles pièces.

La problématique est donc la suivante : comment adapter les méthodologies de conception actuelles pour que celles-ci tiennent compte de la FA ? Après une présentation et une prise en compte des avantages et des contraintes de la FA, nous proposerons dans le paragraphe 4 une évolution de la méthodologie.

### 3 Intégration de la FA dès la conception

Différentes problématiques sont inhérentes à ce changement, certaines étant liées au procédé (comment concevoir des machines de FA toujours plus précises, plus rapides et disposant de meilleures trajectoires d'outil), aux matériaux (lesquels sont utilisables, lesquels peuvent être fusionnés, sont-ils dangereux pour la santé de l'homme, quelle est la santé métallographique des pièces après fabrication), à la complexité de la pièce (quelles sont les contraintes auxquelles la pièce doit répondre, la géométrie satisfait-elle au besoin, comment construire la pièce), à la logistique (comment transporter et stocker les matières premières). Cette liste est non exhaustive mais permet d'illustrer que la conception est loin d'être le seul verrou lié à la maîtrise du procédé et qu'il existe de nombreux paramètres à gérer. Cependant, cet article vise principalement à traiter de la méthodologie de conception s'appliquant à la FA. Un travail préliminaire de recherche a donc été effectué dans le but de montrer divers avantages et problématiques que la FA implique au niveau du travail de conception et qui ne se retrouvent pas avec les procédés de fabrication standards. Ce travail ne saurait être une synthèse exhaustive, mais plutôt le dégagement de grandes pistes de réflexion et de perspectives qu'il semble indispensable d'explorer plus en détail. Ces grandes pistes seront données, à la fin de chaque paragraphe, sous forme d'interrogations ouvertes. De plus, et il est important de le préciser, les pistes de réflexions qui suivront seront orientées dans l'optique de réaliser des pièces métalliques innovantes à un niveau industriel à l'aide du procédé de FA. C'est pourquoi nous verrons davantage d'exemples en rapport avec le procédé CLAD. Bien évidemment, l'industrie utilisant aussi

d'autres types de matériaux (céramiques, polymères), certaines des pistes de recherches suivantes seront transposables à ces matériaux.

### 3.1 Des avantages apportés par la FA aux concepteurs

Le premier avantage est un gain de temps en ce qui concerne le changement d'outils. Dans le cas de l'enlèvement de matière, les outils de coupe s'usent et, occasionnellement, se brisent. Il est nécessaire de s'assurer de leur état sur de courts cycles de production (toutes les 5 ou toutes les 50 pièces environ) et ils doivent être remplacés après des périodes d'utilisation elles aussi assez courtes (1 à 3 jours). Dans le cas de la déformation plastique ou du moulage, les matrices et les moules utilisés ont une durée de vie assez élevée (10 000 à 100 000 pièces) mais sont dédiées à une pièce précise et sont très coûteux (de 10 000 € à plus de 200 000 €). Ainsi, entre deux séries, réside une perte de temps nécessaire au changement d'outillage. La FA utilise toujours le même système pour imprimer les pièces. Il n'y a donc pas de changement d'outil. Ceci donne un très grand avantage au concepteur : la modulabilité des pièces à fabriquer. Il est en effet possible de concevoir des pièces plus complexes sans se préoccuper du passage et de l'encombrement d'un outil de coupe ni de son usure et de petites séries de pièces semblables sans se préoccuper de l'amortissement financier d'un moule. De plus, concernant les procédés d'enlèvement de matière ou de déformation, les pièces n'étant plus usinées dans des bruts, le problème de la mise en position ne se pose plus. Il s'agit donc là de gagner un temps précieux entre la réalisation de deux pièces, non plus au niveau de la machine, mais au niveau de la pièce elle-même (figure 4).

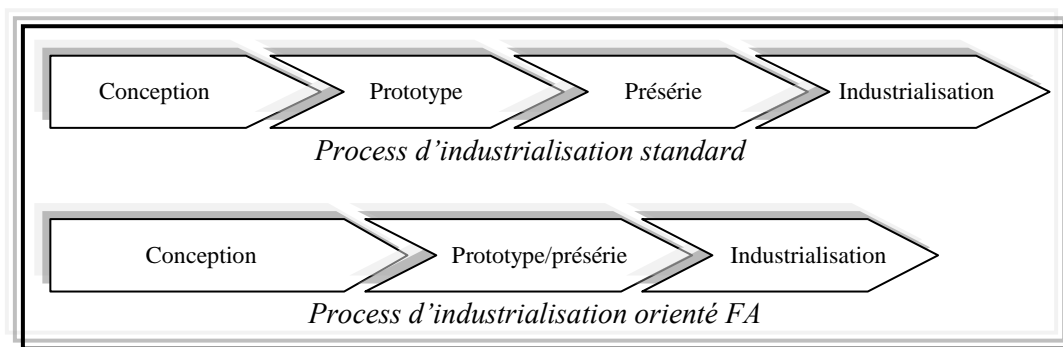


Figure 4. Potentielle augmentation du temps alloué à la phase de conception grâce à la facilité de mise en place des moyens de production

Puisque la matière première est disponible sous forme de poudre, Il est possible d'obtenir un matériau proposant une bonne homogénéité et isotropie [16]. Ceci apporte un grand changement au niveau des contraintes mécaniques. Puisque la pièce résulte de la fusion entre des particules de matière, il est possible de créer des géométries inédites induisant des comportements ou des propriétés jusqu'alors irréalisables. Par exemple, dans le but d'optimiser les critères de poids, de coût matière, de résistance à la flexion et de coût final d'une poutre creuse, tout en ayant comme contrainte une étanchéité à l'eau il serait possible de l'imprimer en métal avec une porosité contrôlée (figure 5). Il faut savoir que pour une pièce d'aviation réalisée par enlèvement de matière à partir d'un bloc d'aluminium, 80% du brut part en copeaux lors de l'usinage. Il y a donc un réel gain financier à effectuer au niveau de la matière première.

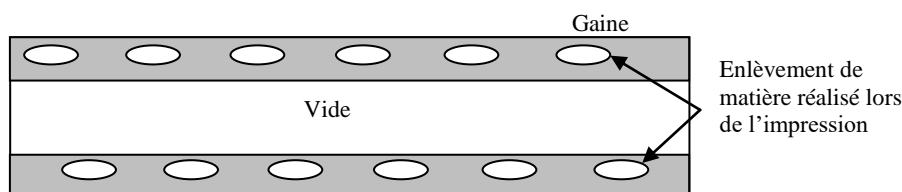


Figure 5. Vue de coupe d'une poutre creuse étanche avec enlèvement de matière interne réalisée en FA

Un autre attrait de la FA est la possibilité de réaliser des objets en petite série sur mesure, soit dans une optique de Mass Customisation (MC), soit dans le but de réduire les coûts de produits à forte valeur ajoutée et à faible durée d'utilisation. Grâce à la FA, de nombreuses pièces, notamment celles en plastique et métal, peuvent être réalisées à l'unité en peu de temps et tout en mobilisant une quantité restreinte de ressources. Ainsi, les contraintes économiques liées à la fabrication de petites séries de produits se libèrent, ce qui offre une plus grande liberté d'action aux concepteurs [17].

Ce procédé ne permettant pas encore de réaliser des pièces parfaites, certains points doivent être pris en compte au moment de la conception sous peine d'obtenir des pièces non fonctionnelles. De plus, comme nous allons le voir, la FA dispose de certaines spécificités par rapport aux procédés traditionnels et ce sont ces spécificités qui amènent à un changement de paradigme.

### 3.2 Des contraintes surfaciques et géométriques

Tout d'abord, il faut noter que l'état de surface obtenu avec la FA ne satisfait pas toujours les contraintes du cahier des charges. Par exemple, la FDM (Fused Deposition Modeling) génère une pièce par dépôt de couches successives de cordons de matière, ce qui donne un aspect ondulé aux surfaces des pièces obtenues. Par conséquent, il faut effectuer une rectification, ce qui implique que la pièce obtenue par FA doit avoir des épaisseurs de matière plus importantes que celles de la pièce finale, comme un brut obtenu en fonderie. Cet état de surface diffère selon le procédé utilisé [18]. Cependant, un gain en précision est certainement à prévoir sur la plupart des procédés et notamment sur ceux de type CLAD (Construction Laser par Addition Directe), permettant de fabriquer des pièces métalliques denses. Ceci permettrait de s'affranchir de la contrainte surfacique. Ce procédé s'apparente fortement à celui d'une imprimante jet d'encre (figure 6). Une buse vient chauffer et projeter des particules de matière, ce qui forme un spray. Pour l'instant, ce sont principalement des poudres métalliques qui sont utilisées. Le spray ainsi généré ajoute de la matière à des endroits précis où l'on souhaite construire ou agrandir la pièce. Ce système permet donc de fabriquer des pièces métalliques proposant des géométries complexes.

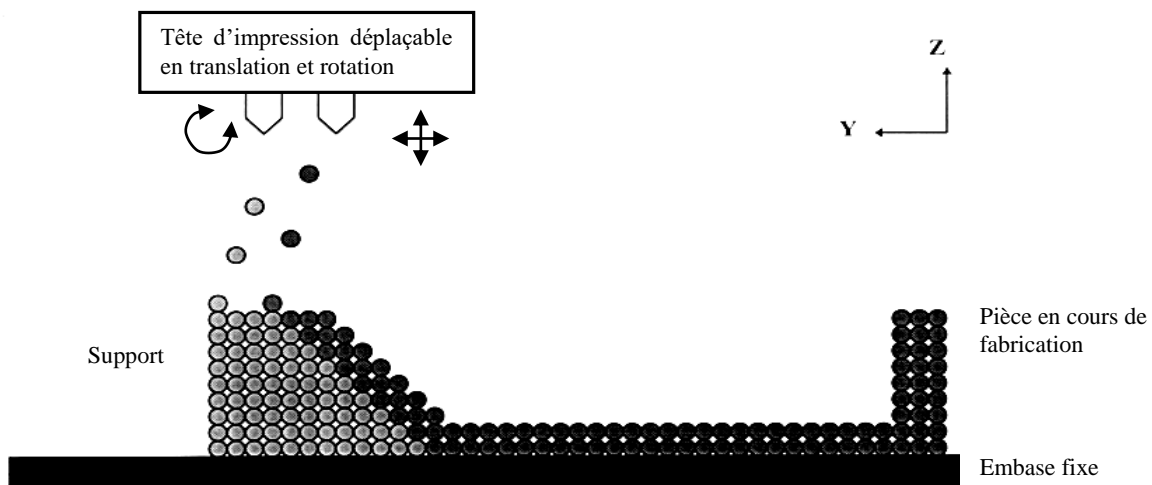


Figure 6. Principe du procédé de fabrication additive CLAD

Un autre point très important est la possibilité de créer ce qu'on appelle des formes libres. Autrement dit, la FA permet de générer des volumes uniques dont la complexité est telle qu'ils ne peuvent être obtenus par enlèvement de matière. Ceci permettrait, entre autre, de fabriquer des treillis complexes en une seule pièce.

Ainsi, lors de la conception il faudra tenir compte des points suivant :

- La surface est-elle fonctionnelle ?
- Quelle sera la déformation de la surface obtenue ?
- Quelle est l'épaisseur à donner pour que la rectification soit possible ?

- Le matériau utilisé permet-il un état de surface répondant au besoin?

### 3.3 Concevoir en multimatériaux

Les procédés de fabrication additive vont de plus en plus permettre l'apparition de pièces multimatériaux [19]. Néanmoins, la conception de ces pièces d'une nouvelle génération ne peut s'effectuer sans un minimum de connaissances et de règles concernant les matériaux. De la même manière qu'il est impossible de faire adhérer du téflon à un autre matériau sans passer par des procédés de fabrication spécifiques, la conception de pièce multimatériaux ne pourra se faire de manière irréfléchie. Il sera donc nécessaire de constituer une base de données des matériaux compatibles à l'assemblage les uns aux autres, d'établir des règles de liaison entre les matériaux et de rendre toutes ces informations disponibles aux concepteurs. De la même manière que des règles sont établies pour la longueur, le diamètre et le nombre de filets en prise d'une vis, de nouvelles règles seront nécessaires pour le gradient de changement de matière d'une pièce à une autre (figure 7). Chaque technique d'assemblage répond à des règles spécifiques qui dépendent des diverses contraintes liées au matériau et à la géométrie des pièces. L'aspect multi matériaux doit être pris en compte de manière méthodique.

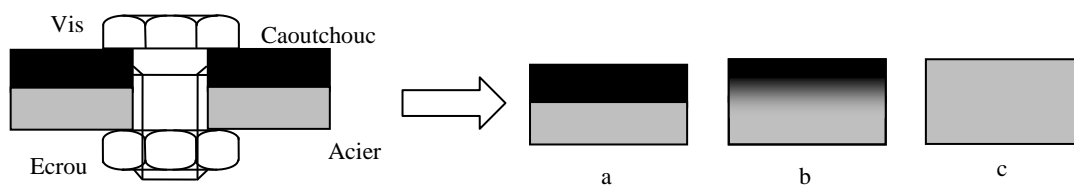


Figure 7. Comment traduire un assemblage mécanique en FA : collage simple (a), frontière en gradient (b) ou matériau homogène (c) ?

Ainsi, on voit se dessiner plusieurs questions auxquelles devra répondre le concepteur :

- Peut-on créer un sous assemblage par strates successives empilées les unes sur les autres ?
- Peut-on générer un gradient de matériau dans la masse ?
- Faut-il générer des formes imbriquées indémontables ?
- Les matériaux sont-ils compatibles ?
- Le procédé d'assemblage permet-il de garantir la conservation des caractéristiques des matériaux assemblés ?

### 3.4 Intégrer un support destructible

Ce qui risque de bouleverser le plus la vision des concepteurs est la présence de support au moment de la réalisation d'une pièce. Ce support n'est en aucun cas fonctionnel. Il sert juste à maintenir la matière en position lors de l'impression. Or, le placement du support est directement pris en compte par les logiciels dédiés aux machines. L'intégration du support doit donc être prise en compte au moment de la conception. Elle soulève deux problèmes. Premièrement, il faut optimiser le placement du support : cela revient à orienter la pièce de manière à ce que le support ne génère pas un défaut de surface (auquel cas la pièce obtenue ne sera pas conforme) et ne pas en mettre là où il est inutile (de manière à réduire la consommation de matière et les coûts de fabrication). Mais une fois que le placement du support a été prévu de manière optimale, il faut tenir compte de son nettoyage. Ainsi, les volumes creux fermés (ou poches de vide) sont à proscrire. Les supports y seraient enfermés sans possibilité de retrait. Les zones où le support est présent doivent aussi être facilement accessibles pour limiter la durée et la pénibilité du nettoyage. Mais il faut aussi prendre en compte la méthode utilisée pour enlever le support. Si, par exemple, le support utilisé est du sel, le moyen évident pour nettoyer la pièce est de la faire tremper dans l'eau. Le processus peut être accéléré à l'aide d'ultrasons. Cependant, ceci ne convient pas aux pièces en acier oxydable. C'est surtout vis-à-vis de ces deux points qu'une méthodologie de conception réfléchie apporte une plus value notable par rapport à ce que le marché propose déjà. Enfin, dans une démarche d'écoconception, il est préférable de tenir compte du recyclage du support avant la mise en fabrication de la pièce. Le support utilisé peut perdre certaines de ses caractéristiques au moment de la FA, ce qui le rend inutilisable en temps que tel. Par



exemple, pour le procédé de FDM, le support utilisé passe d'une forme de fil à une forme de bloc. Cependant, s'il s'agit d'un polymère thermoplastique, il est possible de lui rendre sa forme de fil. A l'inverse, s'il s'agit d'un thermodurcissable, alors le support utilisé est perdu.

Quatre questions se posent donc :

- Y a-t-il besoin de support ?
- Comment optimiser le placement du support ?
- Comment séparer le support de la pièce ?
- Comment recycler le support ?

### 3.5 Concevoir des assemblages mobiles indémontables

Le dernier point important est la conception d'assemblages réalisés en une seule impression. La plupart des assemblages disposent de parties mobiles les unes par rapport aux autres. Or, pour qu'une pièce puisse être en mouvement par rapport à une autre, il est nécessaire d'avoir un jeu précis entre ces deux pièces. Puisque les pièces sont assemblées lors d'une même phase d'impression, le jeu n'est plus réglable. De plus, pour que les deux pièces puissent être imprimées, il sera certainement nécessaire de déposer du support entre ces deux pièces (figure 8). On voit donc apparaître une contrainte importante entre le matériau utilisé pour générer le support, la méthode employée pour l'enlever après l'impression et le jeu généré entre les pièces mobiles. Il est crucial pour les concepteurs de bien maîtriser ce point de manière à ne pas générer des défauts dans les assemblages qui pourraient générer une usure prématurée ou un dysfonctionnement du système mécanique.

Les questions à se poser sont :

- Quelle est l'épaisseur minimale de support admissible ?
- Comment extraire le support sans détériorer l'assemblage ?
- Comment être sûr de l'ajustement entre les pièces ?

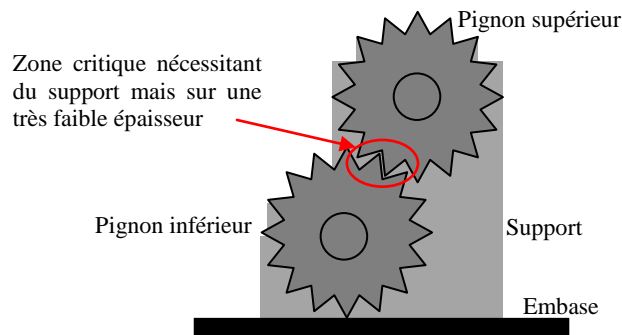


Figure 8. Exemple de situation critique pour l'assemblage de deux pignons réalisés en FA

## 4 Amélioration de la méthode DFAF

Les éléments qui ont été évoqués ci-dessus doivent nécessairement être pris en compte lors de la conception. Or, les notions de support et de pièces métalliques multimatériaux ne sont pas traitées par les méthodologies actuelles. De plus, bien que les problématiques d'état de surface, d'ajustement et d'orientation soient déjà connues des concepteurs, la FA y apporte de nouvelles spécificités.

Le travail de Hugo Rodrigue, orienté reconception est incomplet vis-à-vis des recommandations précédentes. Il s'agit néanmoins d'une base de travail très intéressante. Ainsi, nous proposons donc d'améliorer la méthode DFRM, en prenant en considération les éléments développés précédemment, à l'aide des propositions suivantes.

Tout d'abord, on remarque qu'il est possible de réaliser deux optimisations supplémentaires en parallèles de celles pour la prévention de défaillances et de celle pour le respect des buts de l'utilisateur. Ces deux optimisations sont orientées, pour l'une, vers la fabrication de la pièce et, pour l'autre, vers la quantité de matière première nécessaire. En effet, l'orientation de la pièce influence sur les besoins en support et sur la facilité et le temps nécessaire à la fabriquer. Il y a donc deux facteurs économiques en compétition : coût matière et coût de fabrication.

Dans le but d'étendre le DFRM à la conception de pièces, il peut être intéressant, au niveau de la définition du problème, d'avoir une proposition automatisée de géométries en utilisant, par exemple, une optimisation topologique [20]. En effet, dans le cas présent, il n'est possible d'utiliser le DFRM que si le concepteur possède une maquette CAO. Ceci offrirait un gain de temps pour la modélisation et permettrait d'éviter quelques erreurs.

L'étape de consolidation de pièces peut elle aussi être améliorée. Théoriquement son seul rôle est de simplifier la maquette CAO en vue de diverses optimisations. Or, le concepteur ayant déjà une certaine base de connaissances, cette étape pourrait s'accompagner d'une aide à la présélection de matériaux en fonction des contraintes du cahier des charges et dans le but de fusionner certaines pièces. Cette étape pourrait en partie reposer sur une analyse du cycle de vie [21].

Enfin, dans le but de satisfaire les besoins du client, un outil d'aide à validation des géométries et des surfaces doit être développé. Celui-ci aurait pour but de contrôler l'état de surface des surfaces fonctionnelles et la fabricabilité de chaque pièces afin d'éviter les défauts tels que les poches de vide.

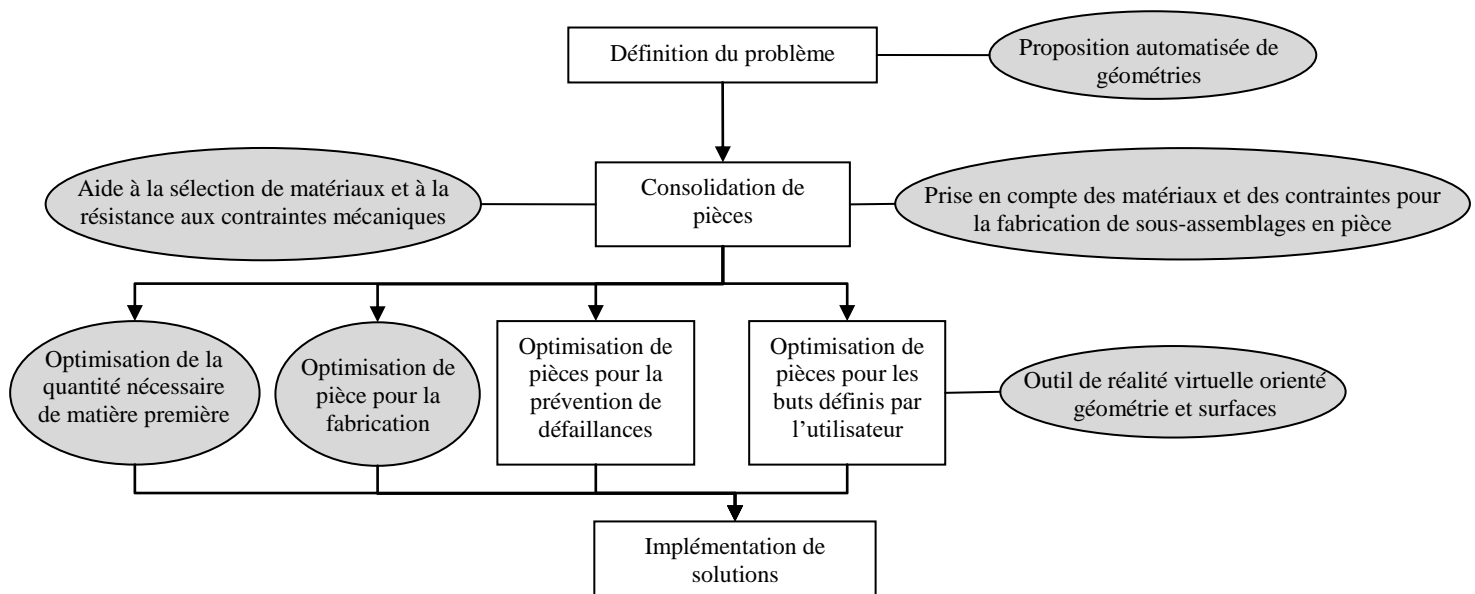


Figure 9. *Méthodologie de conception initiale (rectangles) et pistes d'amélioration (ellipses)*

Le schéma ci-dessus reste volontairement à un niveau très large et ne donne pas les détails techniques pour la réalisation de chaque élément. Ceci est actuellement l'objet d'un travail de thèse. Le but est donc de cartographier les différentes méthodes nécessaires tout en laissant un certain choix au concepteur dans l'exécution de celles-ci. Par exemple, l'optimisation de pièces pour la fabrication peut-être effectuée à l'aide d'une méthode SPO (Successive Pareto Optimization) [22] ou d'un algorithme génétique [23].

Cependant, si ce schéma semble répondre à notre problématique - comment faire évoluer les méthodologies de conception actuelles pour que celles-ci tiennent compte de la FA ? -, il manque encore deux conditions nécessaires à son fonctionnement : une communication parfaite entre les différents éléments et une très grande facilité d'utilisation. En effet, si le choix des méthodes peut être laissé au libre arbitre du concepteur (ou préconisé en fonction du cas d'étude), il faut que les résultats

obtenus en sortie d'une étape soient compatibles avec les données d'entrée de l'étape suivante. De plus, cette méthodologie visant à être utilisée par des personnes, sa bonne utilisation doit avant tout passer par une acceptation et une familiarisation de la part des concepteurs. Ceci est facilité par l'ergonomie [24] de la méthodologie.

## **5 La réalité virtuelle comme support possible de la CAO**

Ces deux problématiques, ergonomie [25], [26], et communication [27], [28], sont récurrentes dans le domaine de la conception, mais pas nécessairement traitées de concert. Certaines études dans le domaine de la réalité virtuelle tentent cependant d'associer les deux.

L'article « Towards hybrid modelling environments - Merging desktop-CAD and virtual reality-technologies » [29] traite du dessin en environnement immersif. Ici, il s'agit d'une phase de recherche en préconception. Les concepteurs sont équipés de lunettes stéréoscopiques et d'une interface physique. Ils sont alors prêts à réaliser des esquisses en trois dimensions. Ces esquisses peuvent ensuite être redimensionnées, tournées dans l'espace ou assemblées à d'autres esquisses pour former des ensembles. Ces esquisses, sous forme de fichiers informatiques, sont ensuite traitées pour pouvoir être importées dans des logiciels de CAO. Il y a donc une rupture dans la chaîne numérique de conception. L'aspect qui est mis en avant est l'interactivité avec un logiciel informatique, favorisant la créativité et l'innovation. Ce type d'interface pourrait être utilisé pour figer des concepts en amont ou pendant l'étape de définition du problème.

Un autre article [31] traite d'une interface multi-sensorielle pour une CAO basée sur la réalité virtuelle. Il présente des idées générales sur les interactions visuelles, sonores et gestuelles. Celles-ci ont depuis été reprises dans des applications telles que la Kinect. Cet article fait davantage office de base de réflexion pour développer de nouveaux moyens d'interaction entre l'utilisateur et un logiciel de CAO, ce qui permettrait d'améliorer l'ergonomie de l'interface. Tout comme dans l'article précédent, l'aspect communication est traité au niveau du dialogue entre l'utilisateur et le système.

## **6 La réalité virtuelle comme aide au changement de méthodologie**

Comme nous venons de le voir, diverses études ont été menées sur la CAO et la réalité virtuelle dans le but d'améliorer le confort de l'utilisateur et de simplifier les démarches de conception. Notre problématique étant de traiter un changement de méthodologie de conception, il semble pertinent d'utiliser cet outil pour dynamiser notre méthodologie et faciliter son acceptation par les concepteurs.

De plus, grâce à des technologies récentes en matériel informatique [32] ou en programmation [33], certaines étapes, comme les optimisations, peuvent être réalisées avec des temps d'exécution compétitifs et des bases de données de plus en plus complètes.

La méthodologie (figure 10) reprend le DFRM en proposant une intégration de la réalité virtuelle. La définition du problème consiste en l'obtention d'une maquette CAO. Dans le cas de la reconception, cette maquette est déjà disponible tandis que dans le cas de la conception, il faut la construire. On voit donc l'intérêt d'utiliser la réalité virtuelle à ce niveau de la méthodologie. La RV fournit un réel apport au niveau de la consolidation de pièces dans le sens où le concepteur a un retour visuel des choix de simplification qui ont été réalisés sur lesquels apparaissent des informations complémentaires. Il est aussi possible de se déplacer autour et dans le produit pour valider ou non les géométries. De plus, pour l'esthétique du produit, un aperçu réaliste des surfaces extérieures est appréciable. L'aide à la sélection de matériaux, quant à elle, ne nécessite pas l'utilisation de la réalité virtuelle. Elle peut être effectuée de manière automatique par un algorithme d'optimisation ou par un concepteur spécialiste en la matière. De la même manière, les optimisations qui suivent se déroulent en fonction des objectifs définis par l'utilisateur. Lors de leur exécution, aucun retour n'est requis. En revanche, à l'issue de l'optimisation de pièces pour les buts définis par l'utilisateur, un retour visuel est nécessaire pour valider ou non les géométries et les surfaces [34]. Enfin, dans le but de sélectionner

la solution qui sera industrialisée, là aussi l'utilisation de la réalité virtuelle est un précieux atout. Elle permet d'obtenir un prototype virtuel et d'interagir avec lui dans un environnement immersif [36].

De plus, la réalité virtuelle apporte déjà beaucoup au domaine de la CAO. Elle permet par exemple de simuler des assemblages en temps réel sur des modèles de pièces dynamiques [35].

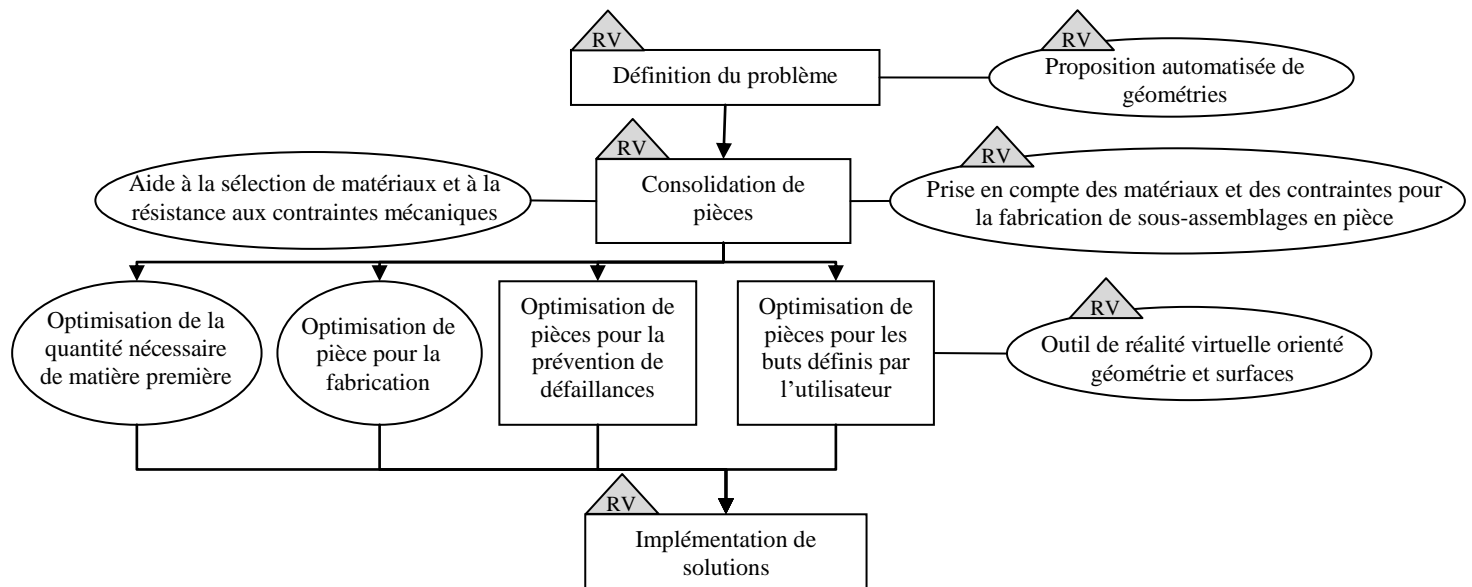


Figure 10. *Méthodologie de conception orientée DFAF (rectangles) avec apports de la réalité virtuelle (triangles)*

## 7 Conclusion

La fabrication additive va apporter un grand changement parmi les procédés de fabrication du monde de l'industrie et que ce changement devra absolument être accompagné d'une méthodologie de conception de produits adaptée. Une méthodologie, le DFAF, a été proposée et doit être améliorée pour réaliser un apport plus complet et plus intuitif au monde de la conception.

Ainsi, pour l'accompagnement du concepteur dans le changement de méthodologie, certaines solutions proposées par la RV semblent pertinentes et prometteuses. Grâce à la réalité virtuelle, l'implémentation de la méthodologie DFRM dans les logiciels de CAO permettrait un énorme gain de temps pour la conception et l'industrialisation d'une pièce, ainsi que pour la prévention de risques. On pourrait aussi imaginer « visiter » la pièce de l'intérieur et non plus de se contenter d'une visualisation externe, ou bien encore représenter en temps réel les déformations de la pièce inhérentes à la FA. On pourrait également simuler la position des supports et leurs effets sur l'état de surface lors du nettoyage.

L'aspect multimatériaux d'une pièce est une nouvelle dimension à laquelle les concepteurs devront désormais faire face et qui pourra être traitée à l'aide de cette nouvelle méthodologie, la RV venant apporter une aide au niveau de la visualisation et des possibilités d'assemblages des matériaux.

Cette méthodologie permettrait aussi, dans le cas où les matériaux utilisés s'y prêtent, la fabrication de systèmes préassemblés. Cependant cela soulève le problème de l'entretien et de la maintenance.

Enfin, cette méthodologie vient aussi apporter une avancée dans le cadre de l'écoconception en optimisant les quantités de matière consommées et en supprimant les déchets de type copeaux et huile de coupe.

## Références

- [1] Geoffrey Boothroyd, « Product design for manufacture and assembly », Computer-Aided Design, Volume 26, Issue 7, July 1994, Pages 505-520
- [2] Alain Bernard, A. Fischer, « New Trends in Rapid Product Development » , CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 635-652
- [3] Steffen Nowotny, Siegfried Scharek, Eckhard Beyer, Karl-Hermann Richter, « Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition », Journal Of Thermal Spray Technology, Volume 16, Issue 3, September 2007, Pages 344-348
- [4] Suk-Joong L. Kang, "Sintering : densification, grain growth, and microstructure", Technology & Engineering, January 2005, 265 pages
- [5] Iwan Zeina, Dietmar W. Hutmacherb, "Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications", Biomaterials, Volume 23, Issue 4, 15 February 2002, Pages 1169–1185
- [6] Sanjay Kumar, "Selective laser sintering: A qualitative and objective approach ", Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Volume 55, Issue 10, 43-47
- [7] J-P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting", Rapid Prototyping Journal, Volume 11, Issue 1, 1995
- [8] T. Wohlers, () “Wohlers Report 2007 State of the Industry Annual Worldwide Progress Report”, Volume 15, Issue 5, 2007, Pages 25 – 28
- [9] Steffen Nowotny, Siegfried Scharek, Eckhard Beyer, Karl-Hermann Richter, « Laser beam build-up welding: Precision in repair, surface cladding, and direct 3D metal deposition », Journal Of Thermal Spray Technology, Volume 16, Issue 3, September 2007, Pages 344-348
- [10] Gideon N.Levya, Ralf Schindel, J.P. Kruthb, « Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (lm) technologies, state of the art and future perspectives », CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 52, Issue 2, 2003, Pages 589-609
- [11] D.T. Pham, R.S. Gault, « A comparison of rapid prototyping technologies », International Journal of Machine Tools & Manufacture 38, 1998, Pages 1257–1287
- [12] L.E. Weiss, R. Merz, F.B. Prinz, G. Neplotnik, R Padmanabhan, L. Schultz, K. Ramaswami, « Shape Deposition Manufacturing of Heterogeneous Structures », Journal of Manufacturing Sytems, Vlolume 16, issue 4, 1997
- [13] Hugo RODRIGUE, Mickaël RIVETTE, Victor CALATORU, Simon RICHIR, « Une méthodologie de conception pour la fabrication additive »
- [14] Redford, A. H., & Chal, J. (1994). Design for assembly: principles and practice, McGraw-Hill: Berkshire, England.
- [15] Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S., & Mayakawa, S. (2002). Extended assemblability evaluation method (AEM). JSME International Journal: Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 45(2), pp. 567-574.
- [16] Wohlers, T. (2007). Wohlers Report 2011, « Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry », annual worldwide progress report, Wohlers Associates: Fort Collins, CO.
- [17] Rodrigue, Hugo, « Méthodologie de conception et d’optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide ». Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, 2010.
- [18] J.Y. Hascoet, R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, « From functional specifications to optimized CAD model: proposition of a new DFAM methodology »
- [19] P. Mognol, P. Muller & J.Y. Hascoet, « A novel approach to produce functionally graded materials for additive manufacturing »
- [20] G. I. N. Rozvany, "A critical review of established methods of structural topology optimization ", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 37, Issue 3, Pages 217-237
- [21] Fabien Deneu, "Méthode de sélection environnementale des matériaux pour la fin de vie des produits par évaluation floue", octobre 2010
- [22] Mueller-Gritschneider, Daniel; Graeb, Helmut; Schlichtmann, "A Successive Approach to Compute the Bounded Pareto Front of Practical Multiobjective Optimization Problems", Journal on Optimization, Volume 20, Issue 2, 2009, Pages 915–934.

- [23] Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T., "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *Transactions on Evolutionary Computation*, Volume 6, Issue 2, 2002, Pages 182–197
- [24] A. Wisner, "Diagnosis in Ergonomics or the Choice of Operating Models in Fields Research", *Ergonomics*, Volume 15, Issue 6, 1972, Pages 601-20.
- [25] X. Liua\*, G. Doddsb, J. McCartneyc, B.K. Hindsc, "Virtual DesignWorks - designing 3D CAD models via haptic interaction", *Computer-Aided Design*, Volume 36, 2004, Pages 1129–1140
- [26] P. Bourdot , T. Convard, F. Picon, M. Ammi, D. Touraine, J.-M. Vézien, "VR CAD integration: Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of CAD models", *Computer-Aided Design*, volume 42, 2010, Pages 445 461
- [27] J. Whyte , N. Bouchlaghem, A. Thorpe, R. McCaffer, "From CAD to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3D building design tools", *Automation in Construction*, Volume 10, 2000, Pages 43–55
- [28] Tiago Martinuzzi Buriol, Sergio Scheer, "CAD and CAE Integration Through Scientific Visualization Techniques for Illumination Design", *Tsinghua Science And Technology*, Volume 13, Issue 1, October 2008, Pages 26-33
- [29] R. Stark, J.H. Israel, T. Wöhler, "Towards hybrid modelling environments - Merging desktop-CAD and virtual reality-technologies", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 59, 2010, Pages 179–182
- [30] X.Y. Kou, S.K. Xue, S.T. Tan, "Knowledge-guided inference for voice-enabled CAD", *Computer-Aided Design*, Volume 42, 2010, Pages 545 557
- [31] Chi-Cheng P Chu, Tushar H Dani and Rajit Gadhi, "Multi-sensory user interface for a virtual-reality-based computeraided design system", *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 10, 1997, Pages. 709-725,
- [32] Mark D. Hill and Michael R. Marty, "Amdahl's Law in the Multicore Era", *Computer*, Volume 41, issue 7, 2008, pages 33-38
- [33] Gropp, William; Lusk, Ewing; Skjellum, Anthony, "Using MPI-2: Advanced Features of the Message Passing Interface", *Massachusetts Institute of Technology*, 1999
- [34] Fabio Bruno, Francesco Caruso, Kezhun Li, Alessandro Milite and Maurizio Muzzupappa, "Dynamic simulation of virtual prototypes in immersive environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 43, Issue 5-6, Pages 620-630
- [35] R. Stoackley, M. J. Conway, and R. Pausch. « Virtual reality on a wim: Interactive worlds in miniature. In *Proceedings of CHI : Human Factors in Computing Systems* », 1995, pages 265–272,
- [36] Abhishek SETH, Judy M VANCE, James H OLIVER, «Combining Dynamic Modeling With Geometric Constraint Management to Support Low Clearance Virtual Manual Assembly »